

УДК 621.391.825

**АНАЛИЗ РАЗЛОЖЕНИЯ СВЕРХКОРОТКОГО ИМПУЛЬСА В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ
СТРУКТУРЕ С ОПОРНЫМ ПРОВОДНИКОМ В ВИДЕ БОКОВЫХ ПОЛИГОНОВ
ИЗ ДВУХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫХ ПОЛУВИТКОВ**

Д.Ж. Жапова, Е.Б. Черникова

Научный руководитель: к.т.н. Е.Б. Черникова

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 40, 634050

E-mail: dragondarima2001@mail.ru

**ANALYSIS OF ULTRASHORT PULSE DECOMPOSITION IN A FOUR-CONDUCTOR STRUCTURE
WITH A REFERENCE CONDUCTOR IN THE FORM OF SIDE POLYGONS
OF TWO CASCADED HALF-TURNS**

D.Z. Zhapova, E.B. Chernikova

Scientific Supervisor: PhD. E.B. Chernikova

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russia, Tomsk, Lenin str., 40, 634050

E-mail: dragondarima2001@mail.ru

***Abstract.** The paper presents the results of quasi-static simulation of a four-conductor line with a reference conductor in the form of side polygons, in which two conductors are shorted by a bridge at the far end. Simulations were performed with different connection of conductors at the far end. Combinational pulses in the time responses of such structures were also revealed. Their delays consist of a combination of mode delays.*

Введение. Радиоэлектронная аппаратура (РЭА) повсеместно используется во всех областях жизнедеятельности человека. Однако уязвимость РЭА к электромагнитным воздействиям может повлечь за собой нежелательные последствия, например, периодические сбои в работе важных установок. Одной из причин нарушения работы РЭА могут являться кондуктивные помехи [1]. Одним из видов кондуктивного воздействия является сверхкороткий импульс (СКИ) [2]. Это сверхширокополосный импульс малой длительности, воздействие которого может быть опасно для РЭА, особенно для критичной. Для защиты РЭА от СКИ предложена технология модальной фильтрации, основанная на модальном разложении импульса на импульсы меньшей амплитуды из-за разницы задержек мод. Эта технология может быть реализована на основе модальных фильтров (МФ) и меандровых линий (МЛ) [3].

Кроме того, известен подход к совершенствованию модальной фильтрации за счет использования многопроводности и зеркальной симметрии проводников. Ранее исследовались различные схемы соединения зеркально-симметричного МФ, во временных откликах которых обнаружены комбинационные импульсы. Однако для более детального анализа появления комбинационных импульсов во временных откликах МПЛП необходимо рассмотреть другие ЛП. Например, представляется возможным исследовать на наличие комбинационных импульсов 4-проводную ЛП с боковыми полигонами, в которой 2 проводника закорочены перемычкой на дальнем конце, так что в результате сигнал проходит путь длиной $2l$.

Цель работы – выполнить квазистатическое моделирование такой ЛП.

Экспериментальная часть. 4-проводная структура с опорным проводником в виде боковых полигонов представляет собой 8 в поперечном сечении прямоугольных проводников на диэлектрическом слое, причем проводники 2 и 3 расположены на одной его стороне, а 6 и 7 на обратной стороне диэлектрического слоя, а опорные проводники 1, 4, 5 и 8 расположены в виде боковых полигонов (рис. 1а). Анализ исходной схемы (рис. 1б) позволяет выделить несколько вариантов ее модификации в зависимости от соединения 2 полувитков длиной l , а концах 2 оставшихся пассивных проводников подключены резисторы. В результате, исследуются схемы, показанные на рис. 1 в, г и д.

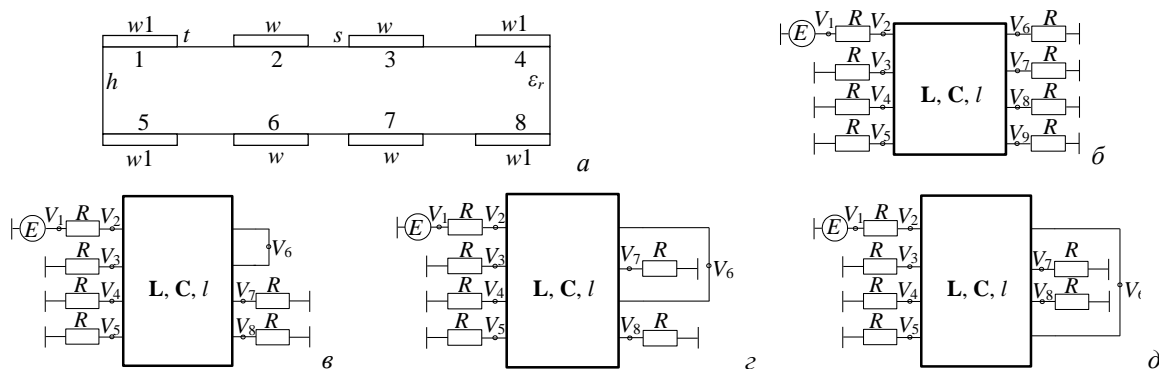


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и схемы соединения: исходная (б), 1 (в), 2 (г) и 3 (д)

4-проводной ЛПП с боковыми полигонами

Результаты. Для анализа разложения СКИ в исследуемых схемах выполнено квазистатическое моделирование при $l=1$ м и $R=50$ Ом в программном продукте TALGAT [4]. Потери в проводниках и диэлектриках не учитывались. В качестве воздействия использовался источник ЭДС в форме трапеции с амплитудой 5 В с длительностями фронта, спада и плоской вершины по 50 пс, так что общая длительность составила 150 пс. Параметры поперечного сечения: ширина проводников $w = 500$ мкм, ширина заземленных проводников $w1 = 1600$ мкм, расстояние между проводниками $s = 220$ мкм, толщина проводников $t = 18$ мкм, толщина диэлектрика $h = 300$ мкм, относительная диэлектрическая проницаемость подложки $\epsilon_r = 4,5$. Полученные формы напряжений на выходе (узлы V_3 , V_4 и V_5 на рис. 1 в, г и д, соответственно) представлены на рис. 2 и 3. В табл. 1 сведены значения погонных задержек мод, а также их значения, умноженные на 2.

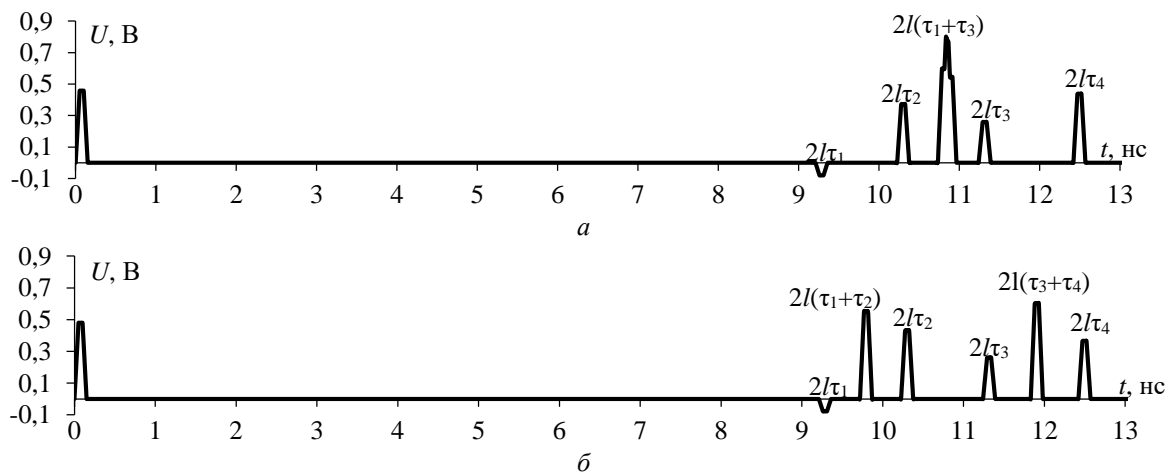


Рис.2. Формы напряжения на выходе схем: 1 (а), 2 (б) при $l = 1$ м

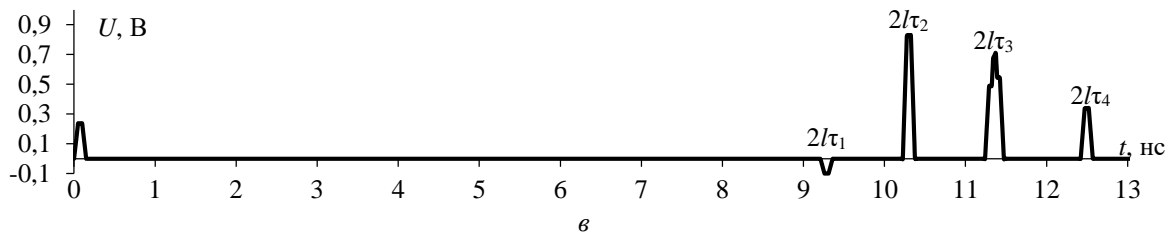


Рис.3. Формы напряжения на выходе схемы 3 при $l = 1$ м

Таблица 1

Значения погонных задержек импульсов (нс/м) для мод 1–4, умноженные на 1, 2

Множитель	1	2	3	4
1	4,60486	5,11329	5,62039	6,21027
2	9,20972	10,22658	11,24078	12,42054

Таким образом, из рис. 2 и 3 видно, что максимальная амплитуда определяется амплитудой комбинационных импульсов либо их наложением с основными и равна для схемы 1 – 0,8 В, для схемы 2 – 0,61 В, для схемы 3 – 0,83 В. Кроме того, важной особенностью временных откликов является наличие среди импульсов с задержками, кратными 2 погонным задержкам мод, комбинационных импульсов с задержками не кратными погонным. В явном виде это показано для схемы 2 – $l(\tau_1+\tau_2) = 9,715$ нс/м и $l(\tau_3+\tau_4)=11,83$ нс/м. Можно предположить, что для схемы 1 и 3 импульсов больше, но они приходят почти одновременно с основными. Для схемы 1 это подтверждается возрастанием амплитуды импульса между импульсами мод 2 и 3, а для схемы 3 – самого импульса моды 2 и 3. Для подтверждения данного тезиса в дальнейшем планируется отделить комбинационные импульсы по методике [5]. А также выполнить оптимизацию с их учетом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00187, <https://rscf.ru/project/22-79-00187/> в ТУСУРе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gizatullin, Z.M., Gizatullin, R.M. Investigation of the immunity of computer equipment to the power-line electromagnetic interference // J. of Communications Technology and Electronics. – 2016. – № 5. – P. 546-550. doi: 10.1134/S1064226916050053.
- Mora, N., Vega, F., Lugrin, G., Rachidi, F., Rubinstein, M. Study and classification of potential IEMI sources // System and assessment notes. – 2014. – № 41. – 93 p.
- Gazizov A. T., Zabolotsky A. M., Gazizov T. R. UWB pulse decomposition in simple printed structures // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. - 2016. – V. 58., № 4. – P. 1136-1142.
- Kuksenko S.P., Gazizov T.R., Zabolotsky A.M., Ahunov R.R., Surovtsev R.S., Salov V.K., Lezhnin Eg.V. Simulation and Applied Mathematics // Proc. of the 2015 Int. Conf. on Modeling. – 2015. – P. 293-301.
- Chernikova E.B, Belousov A.O. Method for detecting additional pulses in the time response of structures with modal decomposition // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – Russia, Tomsk, Oct. 23–24, 2019. – P. 0245–0249.